

PROGRAM DE CALCUL PENTRU ANALIZA REGIMURILOR PERMANENTE DE FUNCȚIONARE ALE REȚELELOR PUBLICE DE DISTRIBUȚIE DE MEDIE TENSIUNE

1. Introducere

Analiza regimurilor permanente simetrice de funcționare ale rețelelor electrice publice de distribuție urmărește: determinarea circulațiilor de curenți sau puteri în fiecare ramură componentă a acestora; stabilirea căderilor de tensiune care apar pe tronsoanele sau laturile rețelei; determinarea nivelului de tensiune în toate nodurile rețelei electrice; stabilirea curenților sau puterilor de scurtcircuit în diferite puncte ale rețelei; evaluarea pierderilor de putere și energie în elementele rețelei (linii, transformatoare) și pe total rețea.

În urma unor astfel de analize, care presupun calculul unui număr mare de regimuri de funcționare, pentru diferite variante existente sau de perspectivă, se pot adopta decizii privind configurația și dimensionarea optimă a elementelor rețelei electrice, alegerea mijloacelor de reglare a tensiunii, amplasarea rațională a surselor de putere reactivă în scopul reducerii pierderilor de putere și energie, precum și a îmbunătățirii calității tensiunii, alegerea unui sistem corespunzător de protecție etc. Pentru analiza regimurilor permanente simetrice de funcționare ale rețelelor electrice de distribuție, se adoptă, de regulă, o serie de ipoteze simplificatoare privind reprezentarea elementelor rețelei, precum și a caracteristicilor statice ale consumatorilor alimentați cu energie electrică.

2. Model matematic pentru analiza regimurilor permanente simetrice de funcționare ale rețelelor de distribuție

Rețelele publice de distribuție de medie și joasă tensiune sunt construite în configurație *buclată* și funcționează *radial* în regimurile normale, unul dintre tronsoanele acestor bucle simple fiind scos de sub tensiune, constituind tronsonul de avarie.

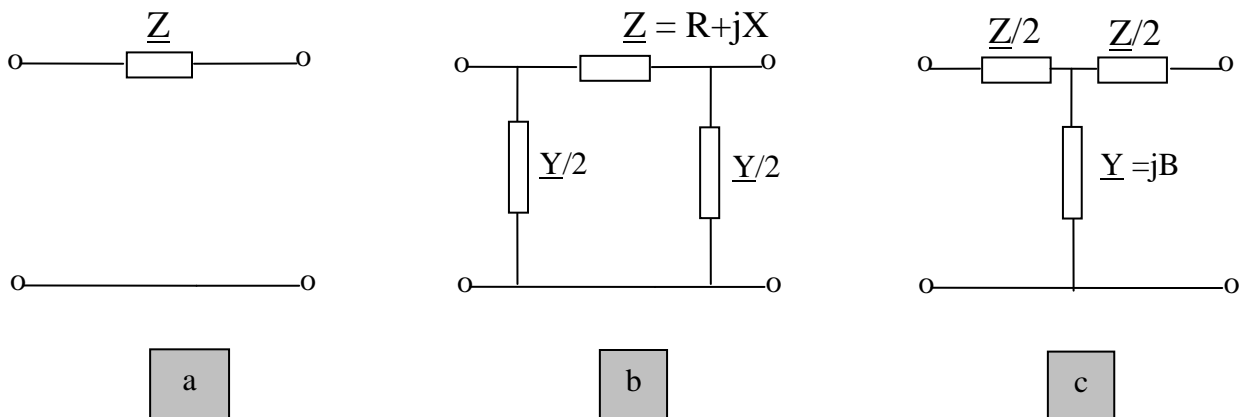


Figura 1. Schemele echivalente ale liniilor electrice scurte

Tronsoanele unor astfel de rețele de medie tensiune sunt scurte și se reprezintă, în schemele monofazate echivalente, prin *dipoli* (Figura 1a) sau *cuadripoli* (Figura 1b și c), cu parametri concentrați.

Dacă nu există posibilități de monitorizare a curbelor de sarcină activă și reactivă zilnice din nodurile rețelelor de distribuție ($P(t)$ și $Q(t)$, $t=\overline{1,24}$), acestea pot fi modelate, pentru zilele caracteristice anuale (zile lucrătoare sau de repaus, în sezonul de vară sau de iarnă), sub forma a 24 de paliere orare, cu ajutorul unei *baze de date* care conține *curbele tip de sarcină activă și reactivă* ale consumatorilor alimentați, a structurii de consum din nodurile rețelei și a unui număr redus de măsurători efectuate în rețea, de regulă, sub formă de curenți, la diferite ore din zi.

Având în vedere că aceste rețele funcționează *radial* în regimurile normale, pentru determinarea circulațiilor de puteri pe laturile sau tronsoanele rețelei, pot fi utilizate următoarele relații matriceale:

$$\begin{aligned} [P_L] &= [A_a]^{-1} [P_N] = [K_r] \cdot [P_N] \\ [Q_L] &= [A_a]^{-1} [Q_N] = [K_r] \cdot [Q_N] \end{aligned} \quad (1)$$

unde:

- $[P_L]$, $[Q_L]$ – vectorii coloană ai circulațiilor de putere activă și, respectiv, reactivă prin laturile sau tronsoanele rețelei;
- $[P_N]$, $[Q_N]$ – vectorii coloană ai puterilor active și, respectiv, reactive absorbite din nodurile rețelei;
- $[A_a]^{-1} = [K_r]$ – inversa matricei de incidență laturi arbore – noduri independente sau matricea coeficienților de repartitie.

Nivelul tensiunii în nodurile rețelei analizate, la nivelul barelor de joasă tensiune ale posturilor de transformare, cunoscând circulațiile de puteri prin tronsoanele sau laturile rețelei, se poate determina cu o relație de forma:

$$U_{n,j,t} = \left(U_{s,j,t} - \Delta U_{n,j,t} \right) \cdot \frac{U_n^{JT}}{U_n^{MT} \cdot \left(1 \pm \frac{p \cdot a}{100} \right)} \quad (2)$$

în care:

- $U_{n,j,t}$ - tensiunea în nodul n al rețelei, în regimul de funcționare j , la ora t ;
- $U_{s,j,t}$ - tensiunea pe barele de medie tensiune ale stației de alimentare, în regimul de funcționare j , la ora t ;
- $\Delta U_{n,j,t}$ - căderea de tensiune pe elementele de legătură de la barele de medie tensiune ale stației de alimentare până la nodul n , în regimul j , la ora t ;
- U_n^{MT} , U_n^{JT} - tensiunile nominale ale înfășurării de medie și, respectiv, de joasă tensiune pentru transformatorul care echipează postul de transformare din nodul n al rețelei;
- p – numărul plotului de funcționare;
- a – treapta de reglare.

Pentru aprecierea calității tensiunii în rețelele electrice, se poate utiliza *criteriul abaterilor maxime admise* sau *criteriile statistice*.

Conform criteriului abaterilor maxime admise pentru aprecierea calității tensiunii în rețelele de distribuție, este necesar ca, în fiecare nod din rețeaua analizată, să se determine abaterile maxime ale tensiunii față de valoarea nominală, pe intervalul de analiză, cu ajutorul unor relații de forma:

$$\Delta U_{n,j,t} = \frac{U_{n,j,t} - U_n}{U_n} \cdot 100, \quad j = \overline{1,12}, t = \overline{1,24} \quad (3)$$

Pentru rețelele de distribuție de medie și joasă tensiune din țara noastră, valorile normale ale abaterilor maxime admise, în cazul variațiilor lente de tensiune, sunt de $\pm 5\%$. Conform acestui criteriu, calitatea energiei electrice livrate unui consumator este corespunzătoare din punct de vedere al tensiunii, dacă valorile ei, în perioada analizată, se înscriu în limitele impuse de norme.

Criteriile statistice pentru analiza calității tensiunii, în cazul rețelilor de distribuție, propun utilizarea următorilor indicatori statistici sau integrali:

- *Valoarea medie a abaterii tensiunii în intervalul T:*

$$\overline{\Delta U}_{n,j} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \Delta U_{n,j}(t) dt \quad [\%] \quad (4)$$

- *Iregularitatea sau abaterea medie pătratică:*

$$I_{n,j} = \overline{\Delta U_{n,j}^2} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \Delta U_{n,j}^2(t) dt \quad [\%]^2 \quad (5)$$

- *Dispersia față de valoarea medie:*

$$\sigma_{n,j}^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (\Delta U_{n,j}(t) - \overline{\Delta U}_{n,j})^2 dt \quad [\%]^2 \quad (6)$$

Cunoscând acești trei indicatori statistici de analiză a calității tensiunii, în toate nodurile rețelei, poate fi apreciată calitatea tensiunii în rețeaua analizată, plaja de variație a tensiunii în diferitele noduri ale rețelei și daunele produse consumatorilor alimentați de calitatea necorespunzătoare a tensiunii de alimentare.

Folosind abaterea medie pătratică $\overline{\Delta U_{n,j}^2}$ sau iregularitatea $I_{n,j}$, exprimată în $[\%]^2$, se poate realiza o apreciere cantitativă obiectivă a calității tensiunii în rețelele electrice de distribuție și anume:

- *foarte bună*, dacă $I_{n,j} \leq 10(\%)^2$;
- *bună*, dacă $10(\%)^2 < I_{n,j} \leq 20(\%)^2$;
- *mediocră*, dacă $20(\%)^2 < I_{n,j} \leq 50(\%)^2$;
- *necorespunzătoare*, dacă $50(\%)^2 < I_{n,j} \leq 100(\%)^2$;
- *foarte proastă*, dacă $I_{n,j} > 100(\%)^2$.

Evaluarea pierderilor de putere și energie în elementele rețelilor de distribuție publice (linii și transformatoare) se poate realiza prin calcule de regim repetate, considerând în nodurile rețelei curbele de sarcină activă și reactivă zilnice, modelate sub forma a 24 paliere orare.

Pierderile de putere activă prin efect termic sau Joule, pe un tronson de linie, pot fi evaluate cu următoarea relație:

$$\Delta P_{l,j}(t) = \frac{P_{l,j,t}^2 + Q_{l,j,t}^2}{U_n^2} \cdot R_l \quad (7)$$

iar pierderile într-un transformator, cu o relație de forma:

$$\Delta P_{l,j}(t) = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{sc} \cdot \left(\frac{\sqrt{P_{l,j,t}^2 + Q_{l,j,t}^2}}{S_n} \right)^2 \quad (8)$$

unde:

$\Delta P_{l,j}(t)$ - pierderile de putere activă înregistrate pe tronsonul l al rețelei sau în transformatorul ce constituie latura l a rețelei, în regimul caracteristic j , la ora t ;

$P_{l,j,t}$, $Q_{l,j,t}$ - puterile activă și, respectiv, reactivă tranzitate prin elementul l al rețelei, în regimul caracteristic j , la ora t ;

U_n - tensiunea nominală a rețelei;

R_l - rezistența tronsonului l al rețelei;

S_n - puterea aparentă trifazată a transformatorului;

ΔP_{Fe} - pierderile active înregistrate în fierul transformatorului;

ΔP_{sc} - pierderile active corespunzătoare regimului de scurtcircuit al transformatorului.

Pierderile de energie, pe intervalul propus pentru analiză, se determină prin însumarea pierderilor orare de putere. De exemplu, pierderile zilnice de energie, pe un element oarecare al rețelei, se calculează cu relația:

$$\Delta W_{l,j} = \sum_{t=1}^{24} \Delta P_{l,j}(t) \quad (9)$$

În cazul în care se dorește evaluarea pierderilor de energie pe o perioadă de timp mai lungă, de exemplu un an, este necesară analiza regimurilor lunare pe tot parcursul anului, în cele patru zile standard ale fiecărei săptămâni, din fiecare lună calendaristică. Folosind relația (9), se determină pierderile zilnice de energie, pentru fiecare lună și pentru fiecare zi standard (caracteristică). Cunoșcând numărul de zile standard pentru fiecare regim caracteristic anual, pierderile anuale de energie, pe un element l al rețelei, se pot calcula astfel:

$$\Delta W_{l,an} = \sum_{k=1}^{12} \sum_{j=1}^4 n_{k,j} \cdot \Delta W_{l,k,j} = \sum_{k=1}^{12} \sum_{j=1}^4 n_{k,j} \cdot \sum_{t=1}^{24} \Delta P_{l,k,j}(t) \quad (10)$$

unde:

$n_{k,j}$ - numărul de zile standard de tipul j , în regimul lunar k ;

$\Delta W_{l,k,j}$ - pierderile de energie care apar pe elementul l al rețelei, pe parcursul unei zile standard de tip j , în regimul lunar k ;

$\Delta P_{l,k,j}(t)$ - pierderile de putere activă pe elementul l al rețelei, corespunzătoare palierului t , din ziua standard sau caracteristică j , în regimul lunar k .

3. Descrierea programului de calcul REGRD

Programul de calcul *REGRD* este destinat analizei regimurilor permanente de funcționare ale rețelelor de distribuție de medie tensiune, în configurație radială. Acest program este scris în limbajul de programare Delphi 3.0, într-o manieră pronunțat conversațională și rulează sub Windows, fiind ușor de utilizat. Modelele matematice pe baza cărora a fost scris acest program de calcul au fost prezentate sintetic în paragraful anterior.

Programul permite crearea unei rețele de distribuție de către utilizator sau deschiderea unui fișier cu datele unei rețele create anterior. La crearea unei rețele de distribuție noi, se deschide inițial o fereastră de dialog (Figura 2), prin intermediul căreia utilizatorul introduce datele esențiale privind caracteristicile structurale ale rețelei și anume:

- tensiunea nominală a rețelei de distribuție de medie tensiune;
- tipul și numărul transformatoarelor din stația de transformare coborâtoare (întâ tensiune/medie tensiune) din care este alimentată rețeaua de distribuție;
- rezistența echivalentă a liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune prin care este alimentată stația de transformare coborâtoare;
- numărul de distribuitori de medie tensiune din rețeaua de distribuție analizată.



Figura 2. Fereastră privind arhitectura generală a rețelei de distribuție de medie tensiune

După completarea tuturor câmpurilor din fereastra privind arhitectura generală a rețelei de distribuție, la apăsarea butonului *O.K.*, se deschide o altă fereastră, în care utilizatorul urmează să definească datele privind laturile și nodurile corespunzătoare fiecărui distribuitor din rețeaua de medie tensiune.

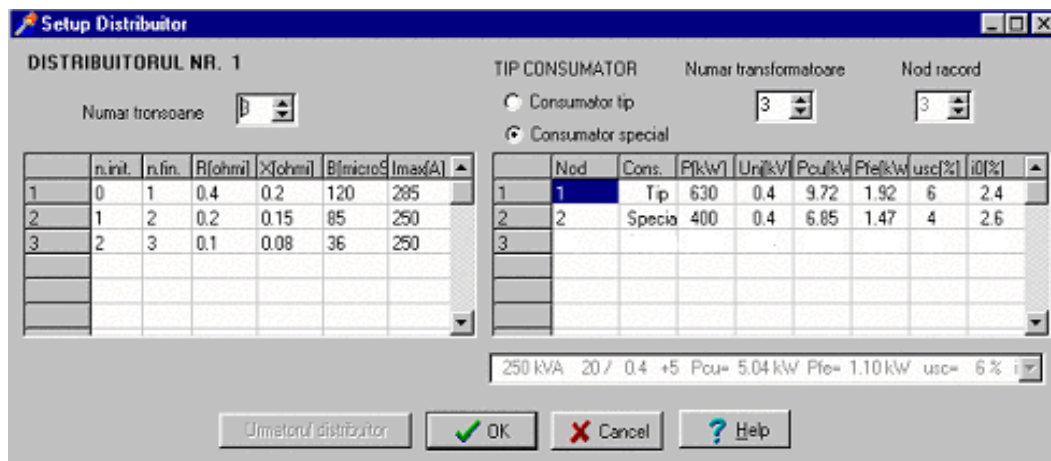


Figura 3. Fereastră pentru introducerea caracteristicilor fiecărui distribuitor din rețeaua de medie tensiune

Atunci când utilizatorul a terminat de introdus toate datele corespunzătoare unui distribuitor, el trebuie să acționeze butonul *Următorul distribuitor* și trece la introducerea datelor pentru următorul distribuitor din rețea. La terminarea introducerii informațiilor despre toți distribuitorii, programul cere

utilizatorului să precizeze numele fișierului în care dorește să fie salvate toate datele despre rețeaua analizată. Acest fișier primește extensia *.ret* pentru a fi ușor de recunoscut atunci când se va dori deschiderea unui fișier de rețea deja existent. Fereastra prin intermediul căreia se introduc caracteristicile fiecărui distribuitor conține o serie de câmpuri, ale căror poziție și denumire sunt indicate în Figura 3.

Pentru modelarea curbelor de sarcină activă și reactivă din nodurile rețelei de distribuție analizate, în regimurile caracteristice anuale, s-a creat, în meniul principal *Opțiuni*, un submeniu numit *Măsurători*, care permite introducerea de către utilizator, de la tastatură, a datelor privind banda de tensiuni pe parcursul unei zile, la nivelul barelor de medie tensiune ale stației de transformare coborâtore, structura de consum a fiecărui nod din rețea și măsurătorile efectuate în rețea (curentul și ora la care s-a efectuat măsurătoarea), pentru fiecare regim caracteristic anual. Structura de consum trebuie indicată printr-un indice subunitar înscris în dreptul unuia sau a mai multor consumatori tip existenți în baza de date. Suma indicilor înscriși trebuie să fie egală cu 1 (adică 100%); în caz contrar, programul indică un mesaj de eroare și solicită utilizatorului să realizeze corectura necesară. De asemenea, în fereastra *Măsurători*, utilizatorul trebuie să indice cel puțin o măsurătoare pentru fiecare nod consumator, în caz contrar, programul nepermițând utilizatorului să treacă la un alt nod. O astfel de fereastră este reprezentată în Figura 4.

BANDA DE TENSIUNI											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U[kV]	20.1	20.1	20.1	20.1	20.15	20.15	20.2	20.2	20.2	20.3	

STRUCT.CONSUM		MASURATORI	
	Pondere	Ora	I[A]
urban	0.7	1	10
rural		2	
spital	0.3	3	
PTTR		4	
liceu		5	
magaz.		6	
hotel		7	

Figura 4. Fereastră pentru introducerea măsurătorilor corespunzătoare fiecărui regim caracteristic

Atunci când utilizatorul a terminat de introdus toate datele, le validează prin apăsarea butonului *O.K.*, moment în care se deschide fereastra *Save as...* care cere un nume pentru fișierul în care vor fi salvate curbele de sarcină modelate pentru regimul caracteristic introdus. Acest fișier primește extensia *.mas* și conține banda de tensiuni și curbele de sarcină deja modelate pe baza curbelor tip și a măsurătorilor efectuate direct în rețea. În continuare, aceste curbe pot fi vizualizate alegând din meniul *Opțiuni* linia *Reprezentări grafice*. În acel moment, se deschide o fereastră în care utilizatorul își poate alege un anumit nod, de pe un anumit distribuitor, pentru care dorește reprezentarea graficului de sarcină activă sau reactivă, într-un anumit regim, specificat de el. Valorile orare ale puterii active sau

reactive sunt indicate într-un tabel alăturat. Prin apăsarea butonului *Abandon*, utilizatorul alege să părăsească fereastra de reprezentări grafice și aceasta se va închide automat.

Dacă utilizatorul alege din meniul *Opțiuni* al programului efectuarea calculelor de regim pentru o oră oarecare din zi și pentru un regim specificat, rezultatele furnizate în urma execuției programului sunt prezentate într-o fereastră de tipul celei ilustrate în Figura 5.

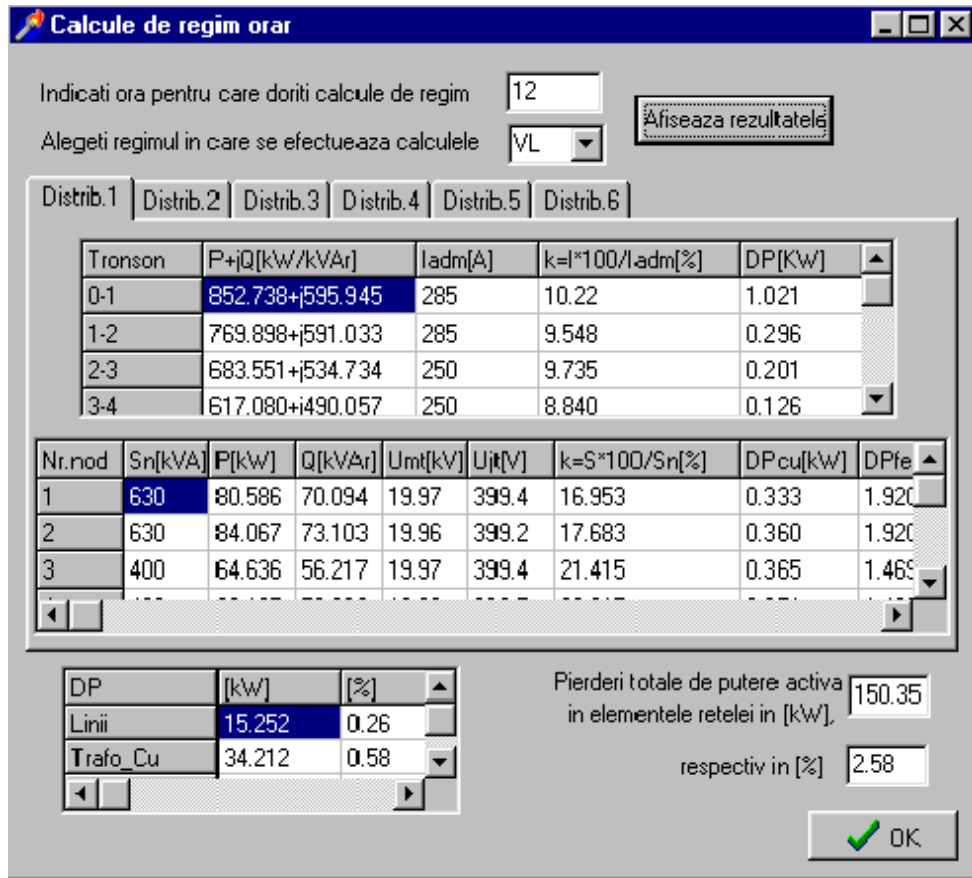


Figura 5. Rezultatele furnizate de programul de calcul REGRD în urma calculului de regim orar

Primele două tabele din Figura 5 cuprind rezultatele calculului de regim, pentru fiecare distribuitor în parte, iar cel de-al treilea, pentru întreaga rețea analizată. Primul tabel cuprinde: circulația de puteri prin fiecare tronson în parte, curentul admisibil limită termic în regim de durată, coeficientul de încărcare pentru fiecare tronson și pierderile de putere activă. Al doilea tabel cuprinde informații despre fiecare nod din rețea și anume: puterea nominală a transformatorului, sarcinile nodale, tensiunile pe bara de medie și, respectiv, de joasă tensiune, coeficientul de încărcare a transformatorului, pierderile de putere activă în transformator (în cupru, fier și globale). Tabelul al treilea cuprinde pierderile totale de putere activă în linii și transformatoare, exprimate în mărimi absolute și procentual, raportate la puterea activă tranzitată prin distribuitor.

În situația în care utilizatorul alege din meniul *Opțiuni* al programului efectuarea calculelor de regim pentru o zi caracteristică (24 ore), este necesar ca acesta să indice doar tipul regimului caracteristic, iar rezultatele furnizate în urma execuției programului sunt prezentate într-o fereastră de tipul celei reprezentate în Figura 6.



Figura 6. Rezultatele furnizate de programul de calcul REGRD în urma calculului de regim, pentru o zi caracteristică (24 ore)

Primul tabel din Figura 6 cuprinde informații referitoare la circulațiile de puteri prin fiecare tronson al unui distribuitor; curentul admisibil limită termic în regim de durată; coeficienții de încărcare la vârf de sarcină și, respectiv, la sarcină medie; pierderile de putere activă la vârf de sarcină, în unități absolute și în procente, prin raportarea la puterea activă tranzitată la vârf de sarcină prin distribuitor; pierderile zilnice de energie activă, în unități absolute și procentuale, prin raportarea la energia activă tranzitată prin distribuitor în 24 ore. Al doilea tabel cuprinde, pentru fiecare nod, următoarele informații: puterea aparentă nominală a transformatorului; puterile nodale active și reactive la vârf de sarcină; tensiunile pe bara de medie tensiune și, respectiv, pe cea de joasă tensiune la vârf și gol de sarcină; coeficienții de încărcare la vârf și sarcina medie a transformatorului; indicatorii integrali de analiză a calității tensiunii (abaterea medie, iregularitatea și abaterea standard); pierderile de energie activă zilnice, în mărimi absolute și în procente din energia vehiculată prin distribuitor în 24 de ore. Al treilea tabel cuprinde pierderile totale de energie activă în linii și transformatoare, în valori absolute și procentual din energia tranzitată prin toată rețeaua de distribuție în 24 de ore.

4. Modul de desfășurare a lucrării

Studentii sau utilizatorii trebuie să certifice înțelegerea modelului matematic și a modului de utilizare a programului de calcul REGRD, destinat analizei regimurilor permanente simetrice de funcționare ale rețelelor de distribuție de medie tensiune. Pentru exemplificare, se va considera o rețea de distribuție urbană de medie tensiune, a cărei schemă monofilară este reprezentată în Figura 7. De asemenea, în aceeași figură, este indicat și modul de numerotare a nodurilor rețelei de medie tensiune, în vederea utilizării programului de calcul REGRD.

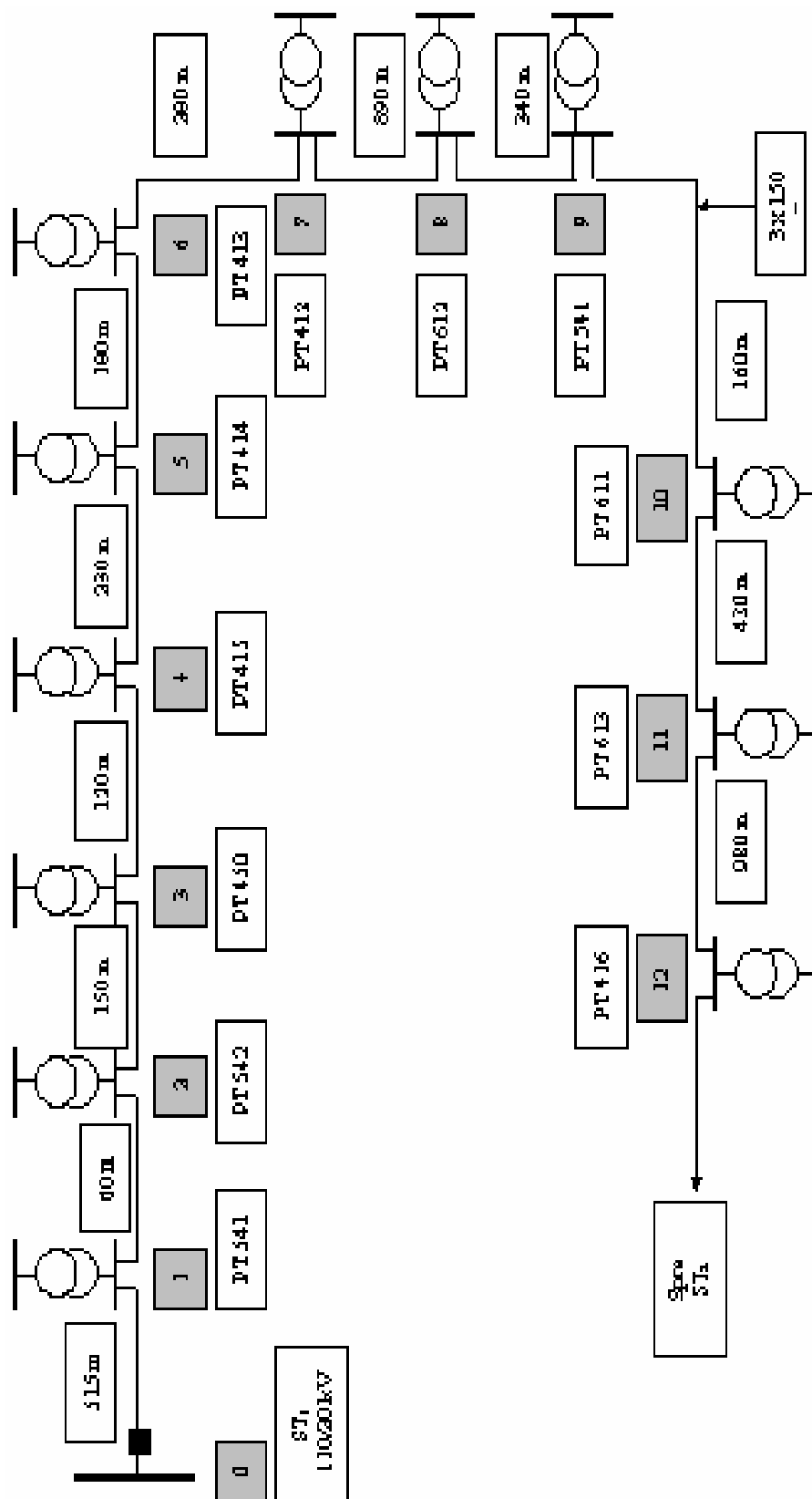


Figura 7. Schema monofilară a rețelei de distribuție de medie tensiune

Laborator Transportul și distribuția energiei electrice - B. Neagu

Rețeaua de distribuție de medie tensiune (20 kV) propusă pentru analiză este formată dintr-un distribuitor de medie tensiune, care are rolul de a alimenta 12 posturi de transformare echipate cu transformatoare, fiecare dintre acestea având puterea nominală de 400 kVA sau 630 kVA, iar consumatorii deserviți prin intermediul lor sunt de tip *casnic* sau de tip *edilitar*.

Datele privind topologia rețelei, caracteristicile de material, structura de consum din noduri și măsurătorile, sub formă de curenți, efectuate pe barele de joasă tensiune ale posturilor de transformare, la o oră oarecare dintr-o zi lucrătoare sau de repaus din regimul rece, sunt sintetizate în Tabelele 1, 2 și 3.

**Structura consumului din posturile de transformare alimentate
din rețeaua de distribuție de medie tensiune**

Tabelul 1

<i>Denumire nod</i>	<i>Nr. nod</i>	S_n^{PT} (kVA)	<i>Structura consumului</i>
PT541	1	400	100% consum casnic
PT542	2	630	100% consum casnic
PT450	3	630	100% consum casnic
PT415	4	630	100% consum casnic
PT414	5	630	100% consum casnic
PT413	6	630	100% consum casnic
PT412	7	400	100% consum casnic
PT612	8	630	100% consum casnic
PT610	9	400	70% consum casnic; 30% centrală termică
PT611	10	400	70% consum casnic; 30% centrală termică
PT613	11	630	90% consum casnic; 10% magazine
PT416	12	630	100% consum casnic

Parametrii de material pentru rețeaua de medie tensiune analizată

Tabelul 2

Tronson		Tip cablu	S	L	R	X	B	I_{adm}
PT_i	PT_j		[mm ² _i]	[m]	[Ω]	[Ω]	[μS]	[A]
ST ₁	PT541	A2YSbY	150	515	0.1061	0.0531	60.52	270
PT541	PT542	A2YsbY	150	60	0.0124	0.0062	7.12	270
PT542	PT450	A2YSbY	150	150	0.0309	0.0158	17.63	270
PT450	PT415	A2YSbY	150	120	0.0247	0.0124	14.10	270
PT415	PT414	A2YSbY	150	230	0.0474	0.0239	27.06	270
PT414	PT413	A2YSbY	150	180	0.0371	0.0186	21.15	270
PT413	PT412	A2YSbY	150	280	0.0577	0.0288	32.91	270
PT412	PT612	A2YSbY	150	890	0.1833	0.0917	104.60	270
PT612	PT610	A2YSbY	150	340	0.0701	0.0351	39.95	270
PT610	PT611	A2YSbY	150	160	0.0329	0.0165	18.65	270
PT611	PT613	A2YSbY	150	430	0.0886	0.0443	50.53	270
PT613	PT416	A2YSbY	150	980	0.2091	0.1091	115.15	270

Laborator Transportul și distribuția energiei electrice - B. Neagu

Toate transformatoarele din posturile de transformare ale rețelei analizate se vor considera ca funcționând pe priza mediană. În ce privește benzile de tensiune menținute pe barele de medie tensiune ale stației de alimentare a rețelei, acestea sunt: $19 \div 20.5$ kV, pentru regimurile de gol de sarcină; $20.7 \div 21$ kV, pentru regimurile normale de funcționare; $21 \div 21.5$ kV, pentru regimurile de sarcină maximă.

Măsurătorile de curent efectuate în posturile de transformare pe partea de joasă tensiune, într-o zi lucrătoare și de repaus, din regimul rece (iarnă)

Tabelul 3

Denumire nod	Nr. nod	Zi lucrătoare		Zi repaus	
		Curent măs. [A]	Ora efectuării măsurătorii	Curent măs. [A]	Ora efectuării măsurătorii
PT541	1	135.6	19	97.3	9
PT542	2	196.3	20	118.6	10
PT450	3	120.4	17	109.7	11
PT415	4	67.8	18	58.2	12
PT414	5	120.3	18	114.7	13
PT413	6	142.8	18	121.3	14
PT412	7	106.5	17	98.6	14
PT612	8	149.4	17	113.5	15
PT610	9	187.5	19	135.2	16
PT611	10	173.8	18	126.3	16
PT613	11	181.4	19	163.8	18
PT416	12	84.7	17	98.2	19

Pe baza datelor furnizate de program, studenții trebuie să aprecieze modul de încărcare a elementelor rețelei, calitatea tensiunii de alimentare la nivelul barelor de medie și joasă tensiune ale posturilor de transformare, folosind fie criteriul abaterilor maxime, fie criteriile integrale, nivelul pierderilor de putere și energie pe elementele rețelei de distribuție (linii și transformatoare), precum și pe total rețea.